

# Assessment of methods of identification of dynamic properties based on measured seismic response of a building

Pablo Alcaíno<sup>1</sup>, Hernán Santa-María<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pontificia Universidad Católica de Chile

## Abstract

The structural monitoring, which is becoming increasingly common, makes it necessary to choose one or more methods of processing and analyzing the obtained data. This choice is key to meeting the objectives of this monitoring. Considering that there are many methods with different capacities and requirements, this choice is a complex problem. This paper presents a methodology for the assessment and selection of methods for the identification of dynamic response properties of buildings using vibration monitoring. In this work, well-known methods based on time domain analysis (subspace-state) and non-parametric methods based on the frequency domain are studied when applied to seismic vibration records for a reinforced concrete building instrumented with a network of tri-axial force-balance accelerometers. For two and a half years, the sensor network has recorded close to 500 sensitive earthquakes. Nonetheless, it only includes those with a magnitude higher than 4.8 ( $M_L$  or  $M_W$ ) and that occurred between September, 2015 and September, 2016. Using six versions of identification methods, modal response parameters are determined for each of the two main directions of the building, considering different levels of information acquired by the sensor network (floor information). An assessment of the performance of each method is conducted based on the number of identified modal frequencies and damping ratios; their variability (coefficient of variation); and the processing time of each method. As a result and conclusion regarding the use of this methodology, it is not only possible to choose the most convenient method for processing vibration records applied to structural health monitoring (SHM) according to its own objective, but also to progressively improve the design of the sensor network.

## OPEN ACCESS

**Published:** 08/02/2019

**Accepted:** 13/09/2018

**Submitted:** 09/01/2018

**DOI:**  
10.23967/j.rimni.2018.11.004

**Keywords:**  
Identification methods  
Dynamic response  
Structural health monitoring

## Resumen

El monitoreo de estructuras, que es cada vez más común, impone la necesidad de escoger uno o más métodos de procesamiento y análisis de los datos obtenidos, siendo esta elección un aspecto clave para el cumplimiento del objetivo de dicho monitoreo. Considerando que existe gran cantidad de métodos con capacidades y requerimientos diferentes, la elección señalada es un problema complejo. En este trabajo se presenta una metodología para la evaluación y selección de métodos de identificación de propiedades de respuestas dinámicas de edificios a partir del monitoreo de vibraciones. Como caso de estudio y ejemplo de aplicación, se han considerado métodos bien conocidos basados en el análisis en el dominio del tiempo (subespacio-estado) y métodos no paramétricos basados en el dominio de la frecuencia, aplicados a los registros de vibraciones producto de sismos en un edificio de hormigón armado que cuenta con una red de acelerómetros triaxiales de fuerza balanceada. A pesar de que en un periodo de 2 años y 6 de meses la red ha registrado más de 500 sismos sensibles, en este trabajo se incluyen aquellos que presentan una magnitud superior a 4.8 ( $M_L$  o  $M_W$ ) y que ocurrieron entre septiembre de 2015 y septiembre de 2016. Por medio de seis versiones de métodos de identificación se determinan parámetros modales de respuesta en las dos direcciones principales del edificio, tomando en consideración diferentes niveles de información adquirida por la red de monitoreo (información por nivel). Una evaluación del desempeño de cada método es realizada en función de la cantidad de frecuencias y razones de amortiguamiento modales identificadas; la

variabilidad de las mismas (coeficiente de variación); y el tiempo de procesamiento requerido para ello. Como resultado y conclusión del uso de esta metodología, se tiene que no solo es posible escoger el método más conveniente para procesamiento de registros de vibraciones aplicado a monitoreo del estado estructural (SHM), según el objetivo del mismo, sino que también es posible mejorar progresivamente el diseño de la red de monitoreo.

**Palabras clave:** Métodos de identificación, respuesta dinámica, monitoreo estructural

## 1. Introducción

El monitoreo de estructuras forma parte de un área reciente de investigación y desarrollo dentro del campo de la dinámica estructural [1,2]. La inspección por medio de sensores sensibles a alguna propiedad física (principalmente aceleración, velocidad o desplazamiento) [3], instalados en puntos estratégicos [4], con el posterior procesamiento de las señales registradas (empleo de métodos de identificación de sistemas), puede permitir evaluar el estado de la estructura mediante la estimación de parámetros de respuesta dinámica [1,4,5,6]. Así, es posible caracterizar el comportamiento de la estructura [7,8] y compararlo con el comportamiento real, reduciendo la incertidumbre de los modelos matemáticos [9]; generar programas racionales y oportunos de mantenimiento e intervención de las estructuras o estimar la vida útil remanente de la misma [10,11]. Por otro lado, existe gran cantidad de métodos para identificar propiedades dinámicas de sistemas estructurales a partir de registros de vibraciones, entre los que

predominan los métodos basados en el análisis no paramétrico en el dominio de la frecuencia (FNP) [12-14] y los métodos basados en el dominio del tiempo, como por ejemplo los métodos de subespacio-estado (*stochastic subspace identification* - SSI) [5,12] o los métodos que usan las *wavelets* [15-17]. Dependiendo del método a emplear, puede requerirse de diferentes niveles de información, ya que existen métodos denominados *output-only* [13] y los *input-output* [12]. En los primeros sólo se requiere conocer la respuesta a una excitación para uno o más grados de libertad del sistema bajo análisis, mientras que en los métodos *input-output* se requiere tener el registro sincronizado de la señal de excitación y las señales de respuesta de uno o más grados de libertad del sistema. Si se cuenta con una señal de entrada y una de salida, se denomina al método como SISO (*single input-single output*), mientras que si se cuenta con una señal de entrada y dos o más de salida se denomina al método como SIMO (*single input-multiple output*). Cada uno de estos métodos está en permanente estudio [18] y constantemente surgen propuestas de mejoras globales, como el método EFDD (*Enhanced frequency domain decomposition*) como evolución del método FNP, o mejoras operacionales, como por ejemplo correcciones para mejor identificación de algunos parámetros [19].

La mayor parte de éstas técnicas han sido desarrolladas en el contexto del monitoreo de máquinas cuya operación está condicionada por frecuencias de excitación prácticamente constantes y conocidas y en condiciones ambientales invariantes. En el caso de la infraestructura civil se presenta una serie de dificultades adicionales, ya que la excitación es difícil de caracterizar, las condiciones ambientales son muy variables (por ejemplo temperatura ambiente, humedad del aire, saturación y contenido de agua del suelo, viento, intensidad del sismo, entre otros) y dependen del tipo de estructura a analizar [20] (por ejemplo grandes estructuras son más sensibles a la temperatura ambiente). Lo anterior en muchos casos obliga a diferenciar entre las versiones determinísticas y estocásticas de algunas de las técnicas previamente señaladas. Aun cuando los diferentes métodos presentados en la literatura se encuentran ampliamente validados, claramente no son todos iguales en sus requerimientos, ni en la información que son capaces de entregar, por lo que el diseño de un sistema de monitoreo y la selección de uno o más métodos de identificación de los parámetros de respuesta dinámica resulta ser un desafío técnico complejo, para el cual hay escasa documentación del desempeño comparativo de los métodos. Por esto, el objetivo de este estudio es presentar una metodología para la comparación cuantitativa de métodos de identificación de propiedades dinámicas en estructuras a partir del análisis de registros de vibraciones. Como caso de estudio y ejemplo de aplicación de la metodología propuesta, se utilizan los registros de aceleración obtenidos en tres niveles de un edificio real. El edificio a considerar en esta investigación corresponde a uno de los edificios de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), el cual consta de 4 niveles y un subterráneo de concreto reforzado, estructurados en base a muros y marcos de corte, alcanzando 17 m de altura sobre el nivel de terreno (acera). Adicionalmente, el edificio cuenta con una estructura reticulada de acero que conforma un quinto nivel (ver Figura 1-a), llegando a una altura total sobre el nivel del terreno de 23 m. Por su parte, la red de monitoreo consiste de 3 acelerómetros triaxiales de fuerza balanceada marca SARA, modelo SL-10, dispuestos según se indica en las Figuras 1 y 2, conectados entre sí mediante la red de datos con la finalidad de sincronizar sus registros cada 60 s. El sistema de monitoreo está configurado para muestrear las aceleraciones por eje a una tasa de 200 Hz guardando registros continuos de 30 min, los que se almacenan hasta que se acaba la memoria para luego ser sobrescritos con nuevos registros continuos. En caso de que ocurra un evento relevante éste se guarda en otra

memoria, considerando un pre y post-evento de 60 s. Se entiende por pre y post evento al registro continuo inmediatamente antes y después de activados los gatillos de encendido y apagado. Estos gatillos corresponden a gatillos STA/LTA recursivos configurados siguiendo las recomendaciones de Trnkoczy [21].

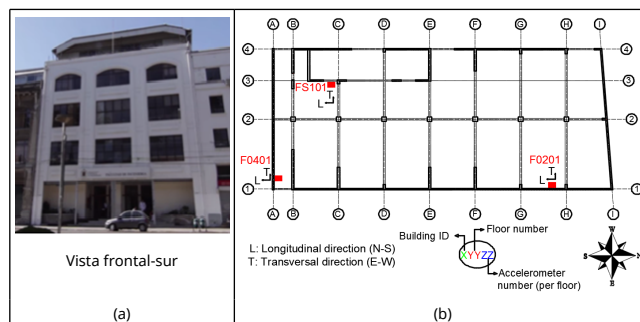


Figura 1. (a) Vista frontal de la estructura bajo estudio y (b) plano estructural de la planta de la estructura y ubicación de los acelerómetros [12].

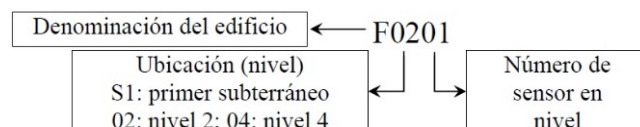


Figura 2. Identificación de cada sensor

Cada uno de los acelerómetros es dispuesto sobre la losa del respectivo nivel con sus ejes horizontales alineados con los ejes longitudinal y transversal del edificio, que a su vez coinciden con las direcciones norte-sur y este-oeste.

## 2. Metodología del estudio

En el presente trabajo se propone una metodología general para a partir de la aplicación de monitoreo estructural (SHM) preliminar, estimar parámetros de respuesta dinámica de interés usando inicialmente  $n$  métodos de identificación, evaluando los métodos a partir de índices de desempeño definidos por el usuario en función de su objetivo específico, lo que permite escoger el más adecuado según la finalidad del SHM a desarrollar.

Esta metodología es aplicada, en forma de ejemplo, a un caso de estudio correspondiente al análisis de frecuencias modales de vibración y razones de amortiguamiento del edificio descrito previamente, con un subterráneo y cuatro niveles de concreto reforzado más un quinto nivel estructurado en acero, emplazado en una zona costera central de Chile.

### 2.1 Metodología general propuesta

#### 2.1.1 Identificación previa del suelo y del sistema

El primer paso en un proceso de monitoreo estructural corresponde a la caracterización inicial del sistema, cuyo diagrama de flujo se muestra en la Figura 3. Las señales registradas en los niveles superiores incluyen tanto las componentes frecuenciales impuestas por el suelo como las impuestas por la estructura, por lo que se vuelve trascendental la caracterización del terreno para diferenciar ambas respuestas. Para esta caracterización se propone seguir dos caminos complementarios desacoplados, uno conducente a la caracterización básica de la frecuencia resonante del suelo y el otro conducente a estimar el ancho de banda en que se encuentran las frecuencias de vibración de la estructura bajo estudio.

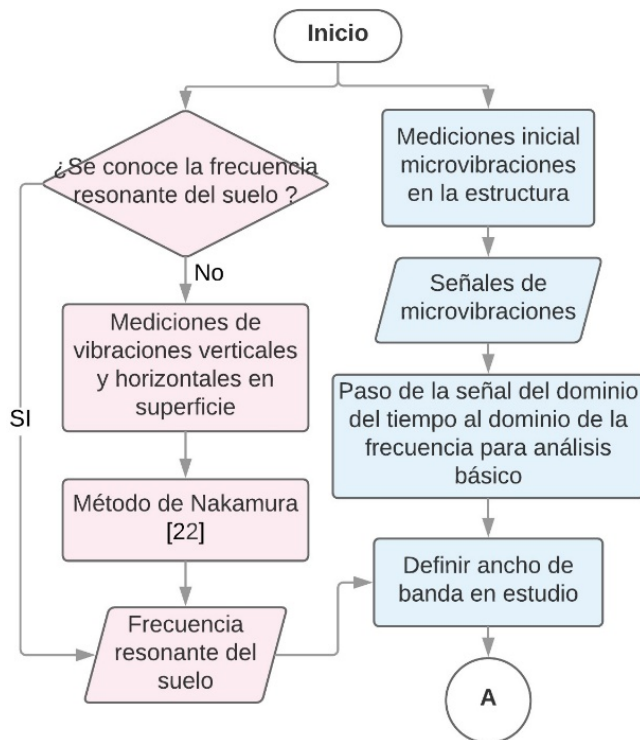


Figura 3. Diagrama de flujo propuesto para la caracterización inicial del problema.

Para la caracterización del suelo, se propone el uso de un método simple y validado en la práctica, como es el método de Nakamura [22], el que se basa en el análisis en el dominio de la frecuencia de registros de microvibraciones en la superficie del suelo, a partir del cual se estima el ancho de banda de frecuencias de vibración propias del suelo (frecuencia resonante). Este aspecto debe ser considerado en el análisis de la estructura, ya que como la(s) componente(s) de frecuencias del suelo es (son) parte de la excitación, ésta(s) forma(n) parte de la respuesta total del sistema y es un error relativamente usual considerar las frecuencias propias del suelo como frecuencias modales de la estructura.

## 2.1.2 SHM y evaluación de métodos de identificación bajo estudio

En la Figura 4 se presenta el diagrama de flujo propuesto para el desarrollo de la evaluación de los métodos de identificación bajo estudio, sobre la base de un monitoreo estructural con objetivo bien definido, permitiendo así maximizar el aprovechamiento del SHM. Se puede ver que, el procedimiento comienza exactamente en la salida del diagrama de flujo de la figura 2. También se observa que el diagrama de flujo considera explícitamente si se deben considerar métodos output-only (en aquellos casos en que no se registra la señal de entrada o bien esta no va a ser considerada) o métodos input-output. En todos los casos, los métodos pueden considerar outputs (señales de respuesta) simples o múltiples y el usuario deberá seleccionar los métodos a comparar y los índices de desempeño bajo los cuales realizará la comparación, ya que estos índices dependerán del objetivo y restricciones del usuario: por ejemplo, si el usuario requiere únicamente identificar la máxima cantidad de frecuencias propias de vibración de una estructura, pero debe minimizar la cantidad de sensores y minimizar el tiempo requerido para la identificación, para toma de decisiones en tiempo real (por ejemplo activación de alarmar o sistemas de control), un grupo de índices de desempeño adecuados serían la cantidad de frecuencias identificadas normalizada por la cantidad de sensores usados y el tiempo de

procesamiento.

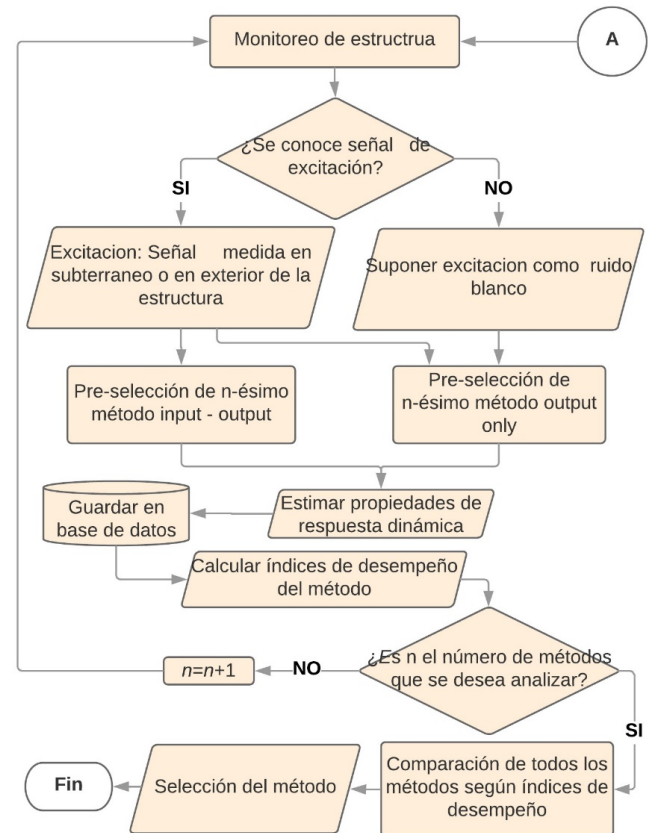


Figura 4. Diagrama de flujo propuesto para la evaluación de los métodos de identificación.

## 2.2 Caso de estudio

### 2.2.1 Identificación previa del suelo y del sistema

Se midieron microvibraciones en el suelo natural fuera de la estructura de estudio con un geófono triaxial Tromino Engy®3G usando una tasa de muestreo de 128Hz. Según lo indicado en la sección 2.1.1, se calculó la razón horizontal/vertical entre espectros de amplitud en frecuencia, que se muestra en la Figura 5, donde se puede ver que la frecuencia propia de vibración del suelo es de 1.41 Hz.

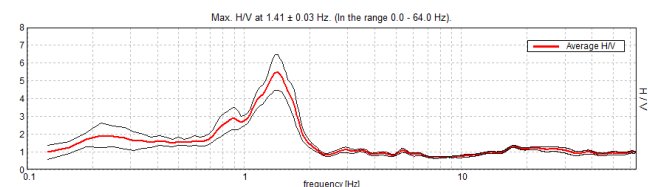


Figura 5. Identificación frecuencia resonante del suelo [12]

Las señales de microvibraciones empleadas para la caracterización previa de la estructura, corresponden arbitrariamente a los pre-eventos (60 s) de los primeros 20 registros sísmicos de la base de datos posteriormente utilizada. Al considerar la frecuencia predominante del suelo (ver Figura 5) y la observación de las señales de pre-eventos en el dominio de la frecuencia según se indica en la sección 2.1.1, siguiendo el diagrama de flujo presentado en la Figura 3, se acota el estudio a un ancho de banda comprendido entre 1.4 a 14 (Hz), ya que la estructura presenta frecuencias con amplitudes de respuesta más relevantes en el rango indicado.

La base de datos utilizada en este caso de estudio, ésta compuesta por 140 registros sísmicos con magnitud superior a 4.8 ( $M_L$  o  $M_W$ ), ocurridos entre septiembre de 2015 y septiembre de 2016. En la Figura 6 se muestran de forma cronológica las aceleraciones máximas medidas (PGA) [23], observando una acumulación de eventos al inicio del intervalo, los que corresponden a los registros del terremoto de Illapel magnitud 8.4 $M_W$  del 15 de septiembre de 2015 y sus posteriores réplicas.

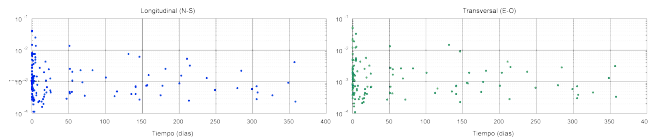


Figura 6. Intensidad de sismos (PGA) en el tiempo

## 2.2.2 Métodos a comparar en el caso de estudio

### ♦ Método en el dominio de la frecuencia no paramétrico (FNP): método espectral.

Este método consiste en el análisis de las máximas amplitudes en el espectro de potencia de cada señal y puede ser trabajado considerado o no la señal de excitación (input-output u output-only respectivamente). Para el caso de estudio se ha considerado sólo las señales de respuesta (output-only) medidas separadamente en los niveles superiores (2 y 4), FNP-2 y FNP-4, respectivamente. Estas señales son representadas en el dominio de la frecuencia para obtener las componentes predominantes en la respuesta dinámica de la estructura a partir de la identificación de las frecuencias con máximas amplitudes promedio de los espectros de potencia obtenidos para segmentos o ventanas de la señal [24]. Se emplean ventanas de Hann con  $2^{10}$ ,  $2^{11}$  y  $2^{12}$  puntos, solapadas un 50%. Finalmente, al tratarse de una señal muestreada, se ajusta una curva mediante spline cúbica y se identifican todos los peaks presentes en los espectros promedio.

Una vez identificadas las frecuencias con amplitudes de potencia predominantes, se define un criterio de agrupamiento para diferenciar las frecuencias que corresponden a un mismo modo de aquellas asociadas a un modo diferente. Tal criterio en este estudio responde a: (1) distancia euclidiana entre frecuencias consecutivas menor a un 10% forman parte de un mismo modo y (2) solo se consideran válidos aquellos grupos formados por más de un 20% del total de registros analizados. Una vez definidas las frecuencias modales, la estimación de la razón amortiguamiento se realiza mediante la técnica del ancho de banda [25], considerando un 80% del máximo local en cuestión, aplicando la corrección sugerida por Boroschek [19].

Finalmente, según el agrupamiento obtenido, las frecuencias modales y sus coeficientes de amortiguamiento son calculadas como el promedio aritmético de cada grupo.

### ♦ Método en el dominio de la frecuencia - EFDD

Este método [14] corresponde a una variante del método en frecuencia no paramétrico. Se trabaja con la primera función de valores singulares, la cual es normalizada para la selección de las frecuencias con máximas amplitudes y se considera un umbral de coherencia igual al 95% utilizando MAC. En este caso también se utilizaron ventanas de Hann con 210, 211 y 212 puntos, y como criterio de agrupamiento se utiliza la distancia euclidiana, tomando como referencia los valores obtenidos en la identificación previa del sistema.

### ♦ Método en el dominio del tiempo, SSI: algoritmo N4SID caso SISO y caso SIMO

En ambos casos se trabaja con su versión estocástica, siguiendo la formulación expuesta en la literatura [26]. En el caso SISO, se consideran las señales de respuesta de los niveles 2 y 4 por separado (SSI-SISO-2 y SSI-SISO-4, respectivamente), logrando dos identificaciones independientes. En todos los casos se ha usado un filtro tipo Butterworth pasa-bajo orden 5, con frecuencia de corte igual a 1.4 Hz en las señales registradas en el subterráneo (señal de excitación) para atenuar la influencia de componentes frecuenciales de la estructura, y de 14 Hz para las señales medidas en los niveles 2 y 4.

La estimación a través de este método, para ambos casos (SISO, SIMO), se realiza de forma iterativa variando el orden del sistema identificado. Se consideran órdenes pares comprendidos entre 2 y 24. Posteriormente se validan las frecuencias y razones de amortiguamiento obtenidas en los casos en que se obtiene (1) un valor de coeficiente de amortiguamiento positivo, menor a 20%; (2) frecuencias predominantes entre 1.4 y 14 Hz (rango predefinido); y (3) coeficientes de amortiguamiento y frecuencias obtenidas a partir de valores propios de la matriz de estado en pares complejos y conjugados, siendo los tres criterios condiciones necesarias para la validación.

Al igual que en los métodos anteriores, como el procedimiento se aplica en forma iterativa sobre la señal, se obtiene una serie de valores que es necesario agrupar, para lo cual se definió asociar al mismo modo aquellas frecuencias consecutivas (independiente del orden) con diferencia inferior a un 15% del valor menor; de estas frecuencias se eliminan todas aquellas con ancho de banda mayor al 40% de la frecuencia menor para cada modo y con repetitividad menor a 5 identificaciones entre los órdenes utilizados (45% de exigencia en estabilidad).

El promedio del grupo se considera como valor representativo del modo, tanto para las frecuencias como para la razón de amortiguamiento.

## 2.2.3 Índices de desempeño utilizados

Para efectos de comparación del desempeño de los métodos, todos fueron implementados en Matlab® y para cada uno de ellos, en ambas direcciones horizontales, se determinaron cuatro parámetros o índices de desempeño. El primero de ellos es la cantidad de frecuencias modales de vibración identificadas ( $f_i$ ); el segundo índice de desempeño considerado es la cantidad de razones de amortiguamiento modales identificadas ( $\xi_i$ ); el tercero de los índices considerados es la dispersión en la identificación de los parámetros señalados caracterizada por el coeficiente de variación (COV) definido como la razón entre la desviación estándar del parámetro identificado y su valor medio. Finalmente se considera también como índice de desempeño el tiempo de procesamiento requerido por cada método.

## 3. Resultados y análisis

Las Tablas 1 y 2 muestran los resultados de la identificación de los parámetros de respuesta dinámica de interés en este estudio, las frecuencias ( $f$ ) y coeficientes de amortiguamiento ( $\xi$ ) modales. En dichas tablas se presenta el valor medio por modo para todo el conjunto de eventos sísmicos de la base de datos utilizada en cada dirección de análisis. Se presentan también las desviaciones estándar y los coeficientes de variación (COV), según lo definido en 2.2.3.

Se puede observar que todos los métodos utilizados en este estudio son muy efectivos en la identificación de las frecuencias de vibración en ambas direcciones principales del edificio, obteniendo bajos coeficientes de variación y poca diferencia



entre métodos (ver Tabla 1).

**Tabla 1.** Frecuencias medias identificadas en cada dirección.

Modo	Método	Dirección Longitudinal			Dirección Transversal		
		f (Hz)	$\sigma_f$ Hz	COV	f (Hz)	$\sigma_f$ Hz	COV
1	FNP-2	2.10	0.212	10.1%	2.36	0.194	8.2%
	FNP-4	2.22	0.211	9.5%	2.57	0.182	7.1%
	EFDD	2.68	0.190	7.1%	2.78	0.276	9.9%
	SSI-SISO-2	2.61	0.213	8.2%	2.82	0.213	7.5%
	SSI-SISO-4	2.70	0.223	8.3%	2.96	0.220	7.4%
	SSI-SIMO	-	-	-	2.94	0.187	6.4%
2	FNP-2	4.51	0.140	3.1%	5.50	0.281	5.1%
	FNP-4	4.69	0.145	3.1%	5.28	0.244	4.6%
	EFDD	4.64	0.405	8.7%	5.99	0.465	7.8%
	SSI-SISO-2	5.09	0.303	5.9%	6.89	0.953	13.8%
	SSI-SISO-4	5.33	0.323	6.1%	6.74	0.517	7.7%
	SSI-SIMO	5.21	0.428	8.2%	6.52	0.631	9.7%
3	FNP-2	7.38	0.367	5.0%	10.65	0.384	3.6%
	FNP-4	7.09	0.356	5.0%	10.49	0.926	8.8%
	EFDD	7.14	0.771	10.8%	12.90	1.155	9.0%
	SSI-SISO-2	8.76	0.835	9.5%	11.89	0.729	6.1%
	SSI-SISO-4	9.64	0.510	5.3%	11.83	1.328	11.2%
	SSI-SIMO	-	-	-	11.91	0.821	6.9%
4	FNP-2	12.38	0.406	3.3%	-	-	-
	FNP-4	12.03	0.756	6.3%	-	-	-
	EFDD	12.08	1.147	9.5%	-	-	-
	SSI-SISO-2	12.19	0.512	4.2%	-	-	-
	SSI-SISO-4	11.40	1.345	11.8%	-	-	-
	SSI-SIMO	10.88	0.965	8.9%	-	-	-

Sin embargo, no ocurre lo mismo con la razón de amortiguamiento (ver Tabla 2). Para el primer modo de vibrar en ambas direcciones, los métodos basados en el dominio de la frecuencia identifican valores creíbles para  $\xi$ , aunque con mucha variabilidad. En cambio, los métodos basados en subespacio-estado, son mejores para obtener mayor cantidad de información modal con menos variabilidad, pero con valores muy altos, lo que les resta utilidad, limitando su uso a estudios comparativos o al estudio de variaciones en dichos parámetros.

A partir de los resultados mostrados en las Tablas 1 y 2, y con los tiempos de procesamiento contabilizados, se calculan los índices de desempeño de cada método en estudio, que se muestran en la Tabla 3, donde la columna L contiene los resultados de la dirección longitudinal; la columna T contiene los resultados en la dirección transversal, la letra E indica que la identificación es exitosa; la letra F indica que la identificación es fallida; # Id corresponde a la cantidad de identificaciones exitosas;  $COV_{m\acute{a}x}$  corresponde al máximo coeficiente de variación del parámetro de la identificación;  $t_{20}$  corresponde al tiempo de procesamiento para 20 registros y finalmente  $t_{pro}$  corresponde al tiempo de procesamiento medio por registro utilizado.

**Tabla 2.** Razones de amortiguamiento identificadas en cada dirección

Modo	Método	Dirección Longitudinal			Dirección Transversal		
		$\xi$	$\sigma_\xi$	COV	$\xi$	$\sigma_\xi$	COV
1	FNP-2	0.029	0.013	45.9%	0.023	0.011	45.4%
	FNP-4	0.027	0.013	46.6%	0.023	0.009	41.7%
	EFDD	0.021	0.016	74.3%	0.026	0.019	71.7%
	SSI-SISO-2	0.111	0.027	24.2%	0.085	0.030	35.0%
	SSI-SISO-4	0.116	0.029	24.7%	0.066	0.026	40.0%
	SSI-SIMO	-	-	-	0.073	0.028	37.9%
2	FNP-2	0.016	0.008	48.0%	-	-	-
	FNP-4	0.015	0.007	44.8%	-	-	-
	EFDD	0.024	0.024	97.1%	-	-	-
	SSI-SISO-2	0.106	0.025	23.1%	0.120	0.039	32.6%
	SSI-SISO-4	0.107	0.019	17.5%	0.144	0.020	13.6%
	SSI-SIMO	0.121	0.021	17.4%	0.155	0.018	11.8%

3	FNP-2	-	-	-	-	-	-
	FNP-4	-	-	-	-	-	-
	EFDD	-	-	-	-	-	-
	SSI-SISO-2	0.099	0.032	32.3%	0.108	0.024	22.2%
	SSI-SISO-4	0.106	0.020	18.8%	0.118	0.013	11.2%
	SSI-SIMO	-	-	-	0.125	0.017	-
4	FNP-2	-	-	-	-	-	-
	FNP-4	-	-	-	-	-	-
	EFDD	-	-	-	-	-	-
	SSI-SISO-2	0.127	0.021	16.2%	-	-	-
	SSI-SISO-4	0.100	0.041	40.6%	-	-	-
	SSI-SIMO	0.122	0.018	15.1%	-	-	-

Se puede observar de estos resultados que todos los métodos, mientras más simple sea la red de monitoreo, son más efectivos tanto para identificar frecuencias como coeficientes de amortiguamiento modales. Lo anterior se explica debido a que en la medida que hay más registros de respuesta que deben ser comparados y correlacionados más resultados quedan descartados y mayor es el tiempo de procesamiento. Sin embargo, el hecho de correlacionar varias señales de respuesta también permite tener menor variación de los resultados. También es posible observar que, entre los parámetros analizados en este trabajo, las frecuencias modales presentan menor dispersión que el amortiguamiento, por lo que naturalmente resulta en un mejor indicador del estado de la estructura [25]. Es posible notar que, tanto para frecuencia como para amortiguamiento, un mismo método que utiliza sólo una señal de salida (FNP-2 y FNP-4 para el método output-only en el dominio de la frecuencia y SSI-SISO-2 y SSI-SISO-4 para los métodos input-output en el dominio del tiempo) permite obtener, en términos prácticos, la misma información (ver Tablas 1 y 2), aproximadamente los mismos índices de desempeño con la información de ambos niveles superiores instrumentados, lo que indica que es posible disminuir la cantidad de instrumentos en la red del caso de estudio, sin comprometer la calidad de los resultados del monitoreo. Como consecuencia de lo anterior, dependiendo del objetivo del monitoreo y de los recursos disponibles, mediante la metodología de análisis aquí propuesta es posible definir en parte la mejor distribución de sensores y el uso del método de identificación más adecuado. Por ejemplo, en el caso de estudio, si el objetivo es controlar un sistema de respuesta o alarma durante la operación del edificio, es claro que el mejor parámetro de control es la frecuencia de vibración, por ser un parámetro con menos variabilidad en su identificación. Del mismo modo, es claro que los métodos SSI serían los más adecuados para cumplir con el objetivo debido a su largo tiempo de procesamiento (notar que el tiempo es un indicador relativo al tiempo utilizado por los otros métodos, ya que, en términos absolutos, depende de las características del ordenador utilizado). Por lo anterior, si fuera tal el objetivo del monitoreo, los métodos basados en el dominio de la frecuencia resultan ser muy adecuados, ya que identifican exitosamente las frecuencias de gran cantidad de modos con muy pocos sensores. Los métodos FNP requieren en este caso sólo 1 sensor, mientras que el método EFDD requiere de al menos 3, por lo que la selección de uno u otro método dependerá de los recursos disponibles.

Si en cambio, el objetivo del monitoreo es estudiar el amortiguamiento de los modos superiores, no cabe duda que los métodos SSI resultan ser más robustos que los métodos basados en el dominio de la frecuencia. Nuevamente, se puede apreciar que trabajar con cada pareja de sensores por separado (subterráneo-nivel superior), permite obtener prácticamente la misma cantidad y calidad de información que usando todos los sensores simultáneamente, pero requiriendo sólo el 55.5% del tiempo de procesamiento.

**Tabla 3.** Índices de desempeño de cada método

Parámetro		FNP-2		FNP-4		EFDD		SSI-SISO-2		SSI-SISO-4		SSI-SIMO		T
		L	T	L	T	L	T	L	T	L	T	L	T	
Frecuencia	$f_1$	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	F	E	
	$f_2$	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	
	$f_3$	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	F	E	
	$f_4$	E	F	E	F	E	F	E	F	E	F	E	F	
	# Id.	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	5	5	
	COV <sub>máx</sub>	10.1%	9.5%	10.8%	13.8%	11.8%	9.7%							
Amortiguamiento	$\xi$	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	F	E	
	$\xi$	E	F	E	F	E	F	E	F	E	F	E	E	
	$\xi$	F	F	F	F	F	F	E	E	E	E	F	E	
	$\xi$	F	F	F	F	F	F	E	F	E	F	E	F	
	# Id.	3	3	3	3	7	7	7	7	7	7	5	5	
	COV <sub>máx</sub>	48.0%	46.6%	97.1%	35.0%	40.6%	37.9%							
Tiempo	$t_{20}$ (s)	18.78	18.78	43.19	7895.89	7895.89	14220.97							
	$t_{prom.}$ (s)	9.39	9.39	21.59	3947.95	3947.95	7110.48							

En cualquier caso, es importante notar que el objetivo del monitoreo debe estar bien definido para que esta metodología de selección del método de análisis sea eficiente y efectivo.

## 4. Conclusiones

Se ha propuesto una metodología general para la comparación del desempeño de diferentes métodos de identificación de parámetros de respuesta dinámica usando monitoreo de vibraciones. La metodología consiste, en que a partir de un análisis de vibraciones usando métodos simples, se define el rango de interés para los parámetros de respuesta dinámica de la estructura bajo estudio, para luego a partir de los datos obtenidos por una red de sensores, utilizar todos los métodos de identificación de sistemas dinámicos para el procesamiento de los registros, obteniendo no sólo los parámetros de interés sino que también calculando índices de desempeño para cada método, para compararlos y en función del objetivo del monitoreo y de los recursos disponibles, seleccionar el método más apropiado.

Tres métodos de identificación, bien conocidos y validados, han sido utilizados en un caso de estudio y ejemplo de aplicación de la metodología, considerando diferentes versiones de los mismos (seis en total) en cuanto a la cantidad de información requerida para su aplicación. Una serie de índices de desempeño de los métodos han sido propuestos y utilizados, sin perjuicio de que cualquier usuario de la metodología puede considerar otros índices según estime más conveniente para su caso específico. Los índices de desempeño propuestos permiten distinguir con facilidad qué parámetros de respuesta dinámica está logrando identificar, la calidad y estabilidad de dicha identificación, así como el tiempo y cantidad de información requeridos para su obtención, lo que facilita la selección del método de identificación de sistemas que mejor se ajusta a las necesidades y posibilidades técnicas y económicas de su proyecto. Del mismo modo al comparar los índices de desempeño de cada versión de los métodos estudiados, se puede identificar qué instrumentos no están entregando información relevante o están entregando información redundante, permitiendo disminuir la cantidad de sensores en la red sin perder información valiosa para el análisis de la estructura bajo estudio.

En particular, en el caso de estudio presentado se puede concluir que, para identificar frecuencias modales de vibración, con pocos sensores y en poco tiempo de procesamiento, los métodos no paramétricos basados en el dominio de la frecuencia tienen cierta ventaja sobre los métodos SSI, aspecto que se revierte si el objetivo se trata de identificar el coeficiente

de amortiguamiento de varios modos o de los modos superiores de la estructura.

## Agradecimientos

Los autores de este trabajo extienden sus agradecimientos de CONICYT (Chile) por el apoyo prestado al desarrollo de esta investigación. De la misma forma extienden su agradecimiento a la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso por las facilidades otorgadas para el desarrollo de este trabajo.

## Referencias

- [1] M. Amani, J. Riera y O. Curadelli, «Estimación de parámetros modales de estructuras sometidas a excitaciones ambientales», *Revista Sul-Americana do Engenharia Estrutural*, vol. 1, n° 2, pp. 55-73, 2004.
- [2] H. Wenzel, *Health monitoring of bridges*, London: John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [3] J. Ko y Y. Ni, «Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges», *Engineering Structures*, n° 27, pp. 1715-1725, 2005.
- [4] C. R. Farrar, S. W. Doebling y D. Nix, «Vibration-Based Structural Damage Identification», *Philosophical Transactions of the Royal Society: Mathematical, Physical & Engineering Sciences*, vol. 359, n° 1778, pp. 131-149, 2001.
- [5] F. Hernández, *Análisis de métodos de identificación de variación de propiedades dinámicas*, Santiago: Universidad de Chile, 2009.
- [6] M. Cacho-Pérez, N. Frechilla y A. Lorenzana, «Estimation of modal parameters of civil structures from frequency response function», *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, vol. 33, n° 3-4, pp. 197-203, 2017.
- [7] D. Tobias, D. Fouch y J. Choros, «Loading spectra for railway bridges under current operating conditions», *ASCE Journal of Bridge Engineering*, vol. 4, pp. 127-134, 1996.
- [8] R. Calçada, A. Cunha y R. Delgado, «Dynamic analysis of metallic arch railway bridge», *ASCE Journal of Bridge*, vol. 7, pp. 214-222, 2002.
- [9] R. Boroschek y F. Yáñez, «Experimental verification of basic analytical assumptions used in the analysis of structural wall buildings», *Engineering Structures*, vol. 22, n° 6, pp. 657-669, 2000.
- [10] P. Grundy y G. Chitty, «Remaining life of a suite of railway bridges», de *IABSE Workshop: Remaining fatigue life of steel structures*, Lausanne., 1990.
- [11] F. Mang y O. Bucak, «Experimental and theoretical investigations of existing railway bridges», de *IABSE Workshop: Remaining fatigue life of steel structures*, Lausanne, 1990.
- [12] P. Alcaíno, E. Álvarez y T. Orrego, «Identification of dynamic response parameters of a concrete building during recent earthquakes using structural monitoring», de *16th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, 2017.
- [13] W.-X. Zong y R. Zhou-Hong, «Output-only modal parameter identification of civil engineering structures», *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 17, n° 3-4, pp. 1-16, 2004.
- [14] R. Brincker, L. Zhang y P. Andersen, «Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition», *Smart Materials and Structures*, vol. 10, n° 3, 2001.
- [15] A. N. Robertson, K. C. Park y F. Alvin, «Identification of Structural Dynamics Models Using Wavelet-Generated Impulse Response Data», *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 120, n° 1, 1998.
- [16] W. Bayissa, N. Haritos y S. Thelander, «Vibration-based structural damage identification using wavelet transform», *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 22, n° 5, pp. 1194-1215, 2008.
- [17] J. Lardies y S. Gouttebroze, «Identification of modal parameters using the wavelet transform», *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 44, n° 11, pp. 2263-2283, 2002.
- [18] H. Sohn, C. Farrar, F. M. Hemez y J. J. Czarnecki, «A Review of Structural Health Review of Structural Health Monitoring Literature 1996-2001», de *Third World Conference on Structural Control*, Como, 2002.
- [19] R. Boroschek y F. Hernández, «Corrección de sobrestimación del amortiguamiento en el método del ancho de banda del espectro de potencia», de *X Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Santiago, 2010.
- [20] R. Boroschek, F. Tamayo y R. Aguilar, «Evaluación de los efectos ambientales en un edificio de media altura», de *XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Santiago, 2015.
- [21] A. Trnkoczy, «Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm», de *Deutsches GeoForschungs Zentrum*, Deutschl., 2012.
- [22] Y. Nakamura, «A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface», *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute RTRI*, vol. 30, n° 1, pp. 25-33, 1989.
- [23] R. Riddell, «On Ground Motion Intensity Indices», *Earthquake Spectra*, vol. 23, n° 1, pp. 147-173, 2007.
- [24] J. Bendat y A. Piersol, *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2013.
- [25] T. Tanaka, S. Yoshizawa, Y. Osawa y T. Morishita, «Period and damping of vibration in actual building modes», *Bull. of Seism. Soc. Am.*, vol. 56, pp. 793-813, 1966.

[26] L. Ljung, System Identification: Theory for the User, 1st Edition., Prentice Hall, 1987.